

AGB 星演化过程中的元素核合成*

张妙静^{1, 3, 4}, 张波^{1, 2, 3}, 厉光烈^{1, 3}

(1 中国科学院高能物理研究所, 北京 100039;

2 河北师范大学物理系, 河北 石家庄 050016;

3 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

4 广西师范大学物理与电子科学系, 广西 桂林 541004)

摘要: 简述 AGB 星元素核合成理论的发展历程. 特别是, 对慢中子俘获过程(s-过程)的机制及相关的 AGB 星演化图像作了简单介绍.

关键词: AGB 星; 恒星演化; 慢中子俘获过程

中图分类号: O571.42 **文献标识码:** A

1 引言

AGB 是渐进巨星分支 (Asymptotic Giant Branch) 的简称, 因其在描述恒星演化的赫罗图中的位置非常靠近红巨星分支而得名. 处于 AGB 上的恒星, 简称为 AGB 星. 根据 AGB 星外包层的碳、氧丰度比 C/O, 可将其分为两类: 一类是 C/O < 1 的 MS 星和 S 星; 另一类是 C/O > 1 的 C 星.

自从发现 AGB 星以来, 大量天文观测数据显示, AGB 星光球中的碳和重核素的丰度不同程度地高出一般恒星. 这些观测结果使人们对 AGB 星产生了浓厚兴趣, 并促使人们对 AGB 星进行了深入的研究. 这些研究, 不管是针对 AGB 星演化过程中的元素核合成, 还是针对 AGB 星与恒星大气或星系化学演化的关系, 几乎都是以 AGB 星的核合成理论作为基础. 本文将简要介绍 AGB 星的元素核合成理论. 鉴于 AGB 星的核合成总是与其演化交织在一起, 因此, 在第二节中我们介绍 AGB 星的演化; 第三节介绍 AGB 星中的主要核合成过程——慢中子俘获过程; 第四节介绍 AGB 星核合成理论; 最后是简短的展望.

2 AGB 星的演化

天文观测及理论研究表明, 大部分 AGB 星是

低质量的恒星. 因此, 我们在这里主要介绍质量小于 $8 M_{\odot}$ (其中 M_{\odot} 表示太阳质量) 的中、小质量星的演化.

按照现代恒星演化模型, 从宇宙大爆炸开始, 4 种基本相互作用: 引力、电磁力、弱力和强力逐步由统一走向分离, 夸克、轻子、光子、中间玻色子、胶子、引力子及希格斯子等相继出现. 然后, 随着宇宙的不断膨胀, 其温度逐渐下降, 夸克开始被囚禁, 质子、中子和 π 介子等强子产生, 紧接着通过原初核合成过程生成宇宙中大部分的氢和少部分的氦.

这些成分, 主要是氢和氦的气体云, 由于引力的不稳定性而塌缩、碎裂, 凝聚成原始星云, 其中部分物质进一步凝聚成原恒星. 当原恒星内部达到流体静力学平衡且处于完全对流状态时, 它就被称为主序前恒星. 这种天体在赫罗图中的位置对应于林忠四郎线. 主序前恒星的内部温度过低, 不能发生热核反应. 为了补偿由表面辐射出去的能量, 恒星只能收缩. 收缩释放出的引力能, 一部分用于补偿向外的辐射; 一部分用于增加热能, 使恒星内部温度升高. 随着温度的升高, 恒星将离开林忠四郎线向零龄主序演化.

当恒星到达零龄主序时, 温度可达到 10^7 K 以

收稿日期: 2002-02-04; 修改日期: 2002-05-06

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G20000774); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJ951-A1-101); 国家自然科学基金资助项目(19835010, 19673002, 10175074)

作者简介: 张妙静(1974-), 女(汉族), 广西梧州人, 博士研究生, 从事理论物理研究.

上,这时恒星内部的氢开始燃烧.随着恒星内部的氢不断地合成氦,氢的质量不断减少,而氦的质量不断增加,最终形成一个电子简并的、密度较高的氦核心,在氦核心的外边缘处是燃烧着的氢壳层.当氢的质量减少为原来的 10% 时^[1],恒星中心的氦核心向内收缩,而外包层向外膨胀,释放氢燃烧所产生的能量.与此同时,恒星的表面温度下降而光度增加.恒星结束主序阶段的演化,向红巨星过渡.

当恒星进入红巨星阶段并首次沿红巨星分支攀登时,随着恒星的膨胀,其对流外包层不断向内延伸发展,可以深入到中心部位氢燃烧阶段形成的化学组成变化区域,将氢燃烧阶段生成的产物搬运到整个外壳和恒星表面.同时,在对流外包层与辐射的恒星内部之间留下一个明显的化学组成不连续的区域.这个过程被称为“第一次挖掘”.对于质量小于 $2.5 M_{\odot}$ 的恒星,“第一次挖掘”留下的不连续区域在以后的演化过程中将被氢壳层淹没;对于在此质量限以上的恒星,由于它们演化的时间非常短,因而根本不会发生“第一次挖掘”.“第一次挖掘”改变了恒星表面的化学组成,使挖掘所涉及的、约占恒星总质量 80% 的物质因混合而变得性质均匀.

恒星发生“第一次挖掘”后,氢壳层的燃烧仍在继续,它生成的 ^{12}C 和 ^{16}O 使氦核心质量逐步增大,最终达到临界值 $(1.7-2.5 M_{\odot})$ ^[2-6].当氦核心质量达到临界值时,氦被点燃.这时,恒星演化到了红巨星分支的尖端,对应的温度约为 10^8K .由于小质量星的氦核心是高度电子简并的,因而此时会发生核心的“氦闪”,即氦燃烧是不稳定的爆炸式燃烧,在短时间内放出大量能量.几次氦闪过后,氦核心内的电子简并状态会自动消失,恒星温度升高、压强增大、体积膨胀.恒星体积膨胀又会使温度下降,进而使热核反应恢复为稳定核反应.这时,恒星已离开红巨星分支,落在赫罗图的水平分支上.在这个过程中,恒星表面的成分没有发生变化.对于中等质量的恒星,由于其核心的氢燃烧主要是 CNO 循环,生成的氦核心不是简并的.因此它们不会发生核心“氦闪”,而是直接经历平稳的氦燃烧过程.当恒星核心的氦基本燃尽时,其中心变为碳-氧核心,其能量主要由核心外的氦燃烧壳层提供,而原来的氢壳层的燃烧几乎熄灭.此时,恒星质量已经由于星风作用损失了 10%^[7, 8],恒星进入 AGB 演化阶段,成为一颗 AGB 星.

刚形成的 AGB 星,氦燃烧壳层位于星体的深层处,燃烧层并不太薄.随着燃烧的进行,碳-氧核心质量增大,氢-氦双燃烧壳层逐渐向外推移,氦壳层越来越薄.氦燃烧释放的大量能量使恒星富氦向外推移,氦壳层越来越薄.氦燃烧释放的大量能量使恒星富氦的外包层因受热而向外迅速膨胀,恒星表面温度降低、星体光度增加.在赫罗图上,它从 AGB 的初始点逐渐向右上方的最高点演化,这个阶段称为早期 AGB 阶段.

在早期 AGB 阶段,所有质量大于 $3.5 M_{\odot}$ 的中等质量星,由于星体剧烈膨胀而逐步变冷,最终使氢壳层的燃烧熄灭,于是恒星内只剩下一个氦燃烧壳层.这时,氦壳层以内的碳-氧核心继续向内收缩,而氦壳层以外的恒星外壳向外膨胀.碳-氧核心内电子发生简并,对流外包层越过氢-氦不连续区,深入到原来氢壳层的区域,将氢壳层燃烧生成的灰烬(主要是 ^4He 和 ^{14}N)搬运到恒星外壳,这就被称为“第二次挖掘”.“第二次挖掘”增加了恒星表面的氦丰度,提高了 ^{14}N 和 ^{15}N 的丰度比^[9].

当早期 AGB 阶段结束的时候,恒星的氢壳层再次被点燃,从这一刻起,它成为恒星的主要能源,而氦壳层的燃烧几乎熄灭.这一阶段的恒星一般具有如下结构:其核心收缩为具有通常白矮星大小一样的致密的碳-氧简并核,在它的外面是双燃烧壳层——由内到外分别为氦燃烧壳层和氢燃烧壳层,在双燃烧壳层之间有一个很薄的、处于辐射平衡状态的、富氦的中间壳层.

随着恒星的膨胀,其碳-氧核心的质量逐步增加,当它的外缘接近外包层底部时,恒星进入热脉冲 AGB 阶段.此时,壳层氢燃烧会因背景温度低于 10^7K 而熄灭.这使得 AGB 星释放的能量大为减少,星体表面停止膨胀而转向收缩.由于极薄的氦燃烧壳层自身物质的产能率对温度的变化极度敏感,具有极强的热失控不稳定性,会在极短的时间内释放出极大的能量,而氦壳层的厚度太薄以至于它不可能大量吸收辐射能,所以这时将发生壳层的氦闪.氦壳层的温度及其产生的光度都急剧上升,不仅将外围临近的大气包层底部的氢壳层再度点燃,而且两个壳层燃烧所释放的能量将使整个大气包层急剧地向外膨胀,光度急剧增加,但恒星表面的温度几乎没有明显下降.当星体膨胀到一定程度时,不仅外面的壳层氢燃烧因背景温度降到 10^7K

以下而熄灭,甚至连壳层氦燃烧也随之熄灭. 恒星大气包层因失去内部强辐射压的驱动而在星体自引力作用下开始向中心收缩,星体大气包层底部以内的物质密度和温度随之回升. 一旦氦壳层温度超过 10^8 K, 壳层氦燃烧再次被点燃, 然后恒星将重复以上过程: 失控薄层氦燃烧——点燃壳层氦燃烧——星体大气包层急剧膨胀、光度急剧增加——氢、氦壳层燃烧熄灭——大气包层收缩、光度急剧下降——再次点燃壳层氦燃烧. 这种周而复始的循环过程就是热脉冲. 恒星经历的脉冲数与其初始主序质量密切相关. 一般地讲, 主序质量越大的恒星, 脉冲数越大, 而其脉冲周期越短. 而且, 恒星在每个热脉冲当中的基本性质是相似的, 如氢壳层的光度、氦壳层的光度以及总光度等.

恒星在最初几次热脉冲里, 其温度的变化幅度不太大, 随着脉冲数的增加, 热脉冲振幅增大. 在壳层氦燃烧产能率达到极大时, 燃烧区外面出现短时间的对流壳层, 在其后的脉冲过程中, 对流壳层非常接近于富氮的中间壳层, 随着对流外包层的向内推移, 富氮的中间壳层区与外包层巨大的温度梯度将导致内外物质发生急剧对流, 对流速度会超过外包层膨胀速度. 这种对流将内部壳层氦燃烧中的产物(3α 反应合成的 ^{12}C 和在氦燃烧壳层中通过慢中子俘获过程产生的重元素)带到大气包层, 甚至带到恒星表面. 这个过程被称为“第三次挖掘”. 从恒星结构方面来看, “第三次挖掘”与“第二次挖掘”相类似, 只不过它发生得更快, 而且重复很多次. “第三次挖掘”模型最有力的证据是天文观测发现的大量富碳及重元素超丰的红巨星. 但是, “第三次挖掘”模型在定量计算中始终遭遇很多困难. 一般地讲, 这个模型可以比较容易地解释星族 II 的恒星或者是外包层质量很大的中等质量星的性质. 但是, 它无法说明 C 星的形成.

除了“第三次挖掘”以外, 热脉冲 AGB 阶段的另一个特征是“星风质量损失”——在最后几次热脉冲中, 星体外包层由于过度膨胀, 以至于恒星依靠自引力作用无法将最外面的部分物质拉回, 这些物质在星风作用下被带到星际空间. “星风质量损失”引起了恒星包层质量的缩小, 而被星风带走的那部分物质会在恒星周围形成一个向外扩张的行星状星云. 在最后一个热脉冲中, 恒星包层最终被完全剥光, 呈现出已演化成白矮星的恒星内核. 这时恒星

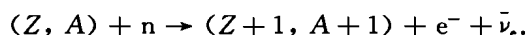
结束 AGB 阶段的演化.

通过对上述的恒星演化图像进行研究, Schwarzschild 等^[10] 和 Sander 等^[11] 得出了一个具有重大意义的结论: AGB 星是发生慢中子俘获过程最合适的场所.

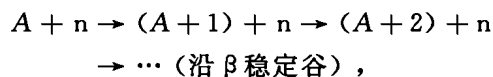
3 慢中子俘获过程

3.1 无分叉慢中子俘获过程

慢中子俘获过程是 Burbidge 等^[12] 在 1957 年提出的, 主要是为解释重元素核合成提供一个物理机制. 重元素是指比铁族元素还要重的元素 ($A > 60$). 所谓慢中子俘获过程, 是指在较低的中子数密度 (约为 $10^8/\text{cm}^3$) 的条件下, 不稳定种子核 (主要是铁族元素) 俘获中子合成重元素的过程. 由于在此过程中同时发生 β 衰变, 而种子核俘获中子的时间远远大于发生 β 衰变所需的时间, 所以被称为慢中子俘获过程, 简称 s (slow)-过程. 也就是说, 在 s-过程中, 种子核 (Z, A) 吸收中子的反应是:

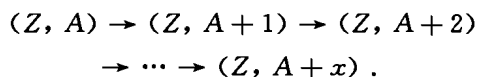


一般情况下, 核素 ($Z + 1, A + 1$) 继续俘获中子, s-过程核反应方式可以表示为



这种沿 β 稳定谷进行的 s-过程称为无分叉 s-过程. 它所经过的核素称为 s-核素. 描述无分叉 s-过程的理论通常被称为 s-过程的经典理论.

除 s-过程外, 他们还提出了一个与之相对应的中子俘获机制——快中子俘获过程, 简称 r (rapid)-过程, 即在中子数密度较高 (约为 $10^{11}/\text{cm}^3$) 的情况下, 种子核俘获中子的速率比其 β 衰变速率快得多, 其核反应链可以表示为



随着 r-过程的进行, 其合成的核素内的中子数不断增加、结合能降低, 上述反应链将在某核素处终止. 一旦中子源消失, 则核素 ($Z, A + x$) 将经过 β 衰变, 直到 β 稳定谷. r-过程经过的核素称为 r-核素.

与比较成熟的 s-过程理论不同, r-过程理论目前仍不太完善, 其物理机制和发生场所都还没有完

全确定. 一般认为, 其场所可能是爆发性的天体环境, 例如大质量星的超新星爆发. 在实际研究中, 由于所有的中子俘获元素几乎都可以通过 r -过程和 s -过程共同合成, 所以在研究 s -过程的时候必须同时考虑 r -过程的贡献. 换句话说, 在一般情况下, 这两个过程不是彼此独立的, 而是相互关联的.

3.2 分叉慢中子俘获过程

近 10 年来, 核物理实验精确地测出了许多重要核素的中子俘获截面以及它们的寿命, 这使得经典的无分叉 s -过程理论很快发展成现代的分叉 s -过程理论. 分叉 s -过程理论认为: 即使在低中子数密度的情况下, 也必须考虑大量不稳定核素发生中子俘获的影响. 例如, 稳定的 ^{133}Cs 俘获中子生成不稳定的 ^{134}Cs . 按经典理论, ^{134}Cs 将发生 β 衰变生成 ^{134}Ba . 但是, 实验数据表明: 在 $1 \times 10^8 \text{K} - 3 \times 10^8 \text{K}$ 的温度范围内变化时, ^{134}Cs 的平均寿命是 46 天到 0.97 年, 而且它的中子俘获截面相当大. 例如, 在中子能量为 30 keV 时, 其截面将达到 1b. 因此, ^{134}Cs 成了 s -过程核反应链的一个分叉点. 它有两个反应道: 一个是发生 β 衰变生成 ^{134}Ba ; 另一个是俘获中子变成平均寿命为 432 年的稳定核素 ^{135}Cs . 这说明, 不再像经典理论所描述的那样全部的 ^{134}Cs 都衰变为 ^{134}Ba , 而只有部分的 ^{134}Cs 发生 β 衰变生成 ^{134}Ba . 从这个简单的例子可以看出, 在考虑了大量不稳定核素的贡献之后, 分叉 s -过程理论比无分叉 s -过程理论更为精确, 其反应链也比后者更为复杂.

4 AGB 星核合成理论

在 AGB 星的研究历史上, 首次将上述的恒星演化图像与慢中子俘获过程联系在一起, 不是恒星模型, 而是天文观测结果. 1952 年, Merrill^[13] 在天文观测中首先发现, 在 S 星的光谱中包含有不稳定重核素 ^{99}Tc . 这个发现马上使人们将 AGB 星的演化跟重元素的核合成联系起来. 从而开始了对 AGB 星核合成的理论研究.

4.1 单辐照理论

20 世纪 50 年代, Greenstein^[14] 首次在 AGB 星演化的氦燃烧阶段引入了两个对重元素核合成至关重要的中子源: 一个是通过质子混合到氦壳层而产

生的 ^{13}C 中子源, 它通过反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 释放中子; 另一个是 ^{22}Ne 中子源, 它通过 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 释放中子, 这里的 ^{22}Ne 是由在壳层氢燃烧中经过 CNO 循环生成的 ^{14}N 在热脉冲开始的早期通过反应链 $^{14}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}(\beta^+ \nu)^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 在氦壳层中自然生成的. 随后, Burbidge 等^[12] 发表了论述元素核合成的著名论文 $B^2\text{HF}$, 其中就包含上述经典无分叉 s -过程理论. 后来, Clayton 等^[15] 延续 Burbidge 等的思想, 用数学方法对控制 s -过程的物理机制进行了唯象分析, 建立了经典无分叉 s -过程方程组, 并给出了解析解. 他们注意到: 在远离幻核的区域, 不同核素的丰度与其中子俘获截面的乘积基本上是不变的, 可以定域地看成是常数. 另外, 为了拟合太阳系重元素的丰度, 他们引入了一个对时间积分的中子流函数——中子辐照. 因此, 他们的理论被称为单辐照理论.

4.2 指数辐照理论

在单辐照理论提出后不久, Seeger 等^[16] 和 Clayton 等^[17, 18] 又指出: 由于中子幻核的中子俘获截面非常小, 相应地它们的中子辐照也不同于一般的核. 因此, 中子辐照不是单值, 而应该是一系列不同的值, 而且这些值的分布应该呈指数形式. 这就是人们常说的指数辐照理论. 因为指数辐照的形式非常简单, 而且能较好地符合太阳系重元素的丰度, 所以这个理论曾一度非常流行. 利用指数辐照理论, 人们很快发现: 在一个天体物理场所中不可能得到所有必需的中子流. 因此, 应该依据不同元素的质量划分区域, 相应地把 s -过程分为 3 个分量: 弱分量、主要分量和强分量. 不同分量具有不同的中子辐照分布, 并对应不同的天体物理环境. 其中, 从 Fe 到 Sr 的 s -核素主要由弱分量产生; 从 Sr 到 Pb 的 s -核素由主要分量产生, 对应的场所是 AGB 星; 强分量产生了约占宇宙中将近一半的 ^{208}Pb . 除了主要分量外, 当时对弱分量和强分量的产生场所都不太清楚. 几乎在同一时期, Schwarzschild 等^[10] 在他们的研究中得出了“氦壳层直接吞没氦壳层中的质子以形成 ^{13}C 中子源”的结论.

20 世纪 70 年代, Ulrich^[19] 根据热脉冲 AGB 模型指出: 当对流的富氮中间壳层的底部温度升高到 $0.8 \times 10^8 \text{K} - 0.9 \times 10^8 \text{K}$ 时, 种子核经历 ^{13}C 中子源的中子辐照而生成新核素. 在经历一个热脉冲之

后, 这些新核素被来自恒星外包层的种子核稀释, 一起经历下一个热脉冲的中子辐照. Ulrich 还指出, 不管中子源是什么, 这个部分重叠的热脉冲循环机制可以自然地产生一个指数形式的中子辐照分布. 继 Ulrich 之后, Iben^[20, 21]对中等质量星进行了研究. 他们认为, 氢壳层中的质子被氦壳层直接吞没而形成¹³C 中子源是不可能的, 可能有的应该是²²Ne 中子源. 当对流的富氮中间壳层的底部温度升高到 3.5×10^8 K 以上时, ²²Ne 通过反应 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 释放中子, 然后种子核俘获中子形成重核素. 他们对上述核合成的结果进行了分析, 发现在 $80 \leq A \leq 210$ 的区域内重核素丰度的渐进分布与太阳系相应区域的核素分布很相似. 不过, Iben 的结果很快就被后来的 s-过程唯象分析和恒星模型的精确计算所否定^[22]. 因为在热脉冲中²²Ne 燃烧释放的中子密度相当高, 在 3.5×10^8 K 时, 可达到 10^{11} /cm³. 这时, r-过程将起作用, 许多分支反应道将被打开, 这会使富中子核素的丰度大大提高, 最终导致所得到的核素丰度分布与太阳系的完全不同. 与 Iben 几乎同时, Ward^[23]考虑了 β^- 衰变与中子俘获的分支比, 给出了分叉 s-过程方程组及其解析解, 并根据 Ulrich 的脉冲中子源模型给出了单脉冲 s-过程方程组的解.

有关 s-过程的这些唯象研究, 虽然为约束 AGB 星核合成模型做出了很大的贡献, 但是, 人们也注意到, 包含²²Ne 中子源的模型存在着以下的困难: (1)模型所给出的 C 星光度远远大于观测值; (2)无法说明“第三次挖掘”图像; (3)无法解释从 AGB 星上观测到的大或小质量的“星风质量损失”. 除此之外, 更为重要的是, 在天文观测中并没有在富 s-过程的恒星上发现²⁵Mg 的超丰. 另外, 人们还发现: 即使在理论上也无法说明质量大于 $5M_{\odot}$ 和 $6M_{\odot}$ 的恒星可演化形成 C 星. 这些因素使人们认识到: 在 C 星形成和 s-过程中扮演主要角色的应该是小质量的 AGB 星. ²²Ne 中子源的困难迫使人们回过头来重新考虑¹³C 中子源存在的可能性. 在此之前, 由于没有适当的混合机制可使质子进入中间壳层, 被¹²C 俘获而生成¹³C, 致使¹³C 中子源一直不受重视.

4.3 对流核合成模型

20 世纪 80 年代, Iben 等^[1]提出了一个适合于低金属丰度、低质量 AGB 星的¹³C 形成机制, 并在

此基础上又提出了一个¹³C 在热脉冲的对流状态下释放中子的 AGB 星核合成模型. 该模型的基本假设是: 每个热脉冲结束后, 在星体冷却、膨胀过程中, 富碳的物质被推到一个低温的区域. 由于部分碳的合成、重组, 导致局部区域的不透明度迅速提高, 这时有可能形成一个半对流的壳层. 通过这个壳层, 少量的氢可以下降到富碳的区域. 当这一区域再次升温时, ¹²C 将消耗所有的质子, 通过反应链 $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+ \nu)^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 生成¹³C, 并形成—个质量约为 $10^{-4} M_{\odot}$ 的¹³C 袋. 热脉冲发生时, 这个袋被吞没, ¹³C 通过 α 过程释放中子, 然后种子核俘获中子生成新核素. 当温度升高到约为 3×10^8 K 时, ²²Ne 中子源被激活, 释放出少量中子, 种子核继续俘获中子生成新核素. 这些新核素最终在“第三次挖掘”中被混合到大气包层. 这里引入²²Ne 中子源的原因是: 天文观测在恒星上发现了一些不稳定核素, 如¹⁶⁴Er 等. 但是, 在理论上, 由于它们的衰变率对温度很敏感, 在¹³C 中子源释放中子的较低温度下会很快衰变完, 因而不可能对最后的核合成结果有贡献. 为了说明这部分核素的丰度, 就必须引入²²Ne 中子源. 非常有趣的是, 这个模型虽然包含了两个中子源, 但它给出的中子辐照分布仍然呈指数形式. 对于这个模型, Boothroyd 等^[24]认为, 半对流壳层不足以形成¹³C 袋. 而 Iben^[25]自己也证实, 该模型不适用于星族 I 的恒星. 但是, 该模型对极低金属丰度的恒星是有效的.

依据这个双脉冲中子源的 AGB 星核合成模型, 人们首次试图在单个 AGB 星中拟合太阳 s-过程的主要分量所对应的核素丰度, 并得出结论: 太阳的核素丰度不是一颗星的 s-过程核合成的结果, 而是星系演化过程中不同质量、不同年龄的多颗星的 s-过程核合成的平均结果. 此外, s-过程的产量强烈地依赖于恒星的金属丰度. 1991 年, Beer^[26]给出了对应的双脉冲 s-过程的解. 与此同时, 我国的研究小组^[27, 28]利用此模型, 结合不同质量 AGB 星内部的物理状况、热脉冲次数、幅度和“第三次挖掘”程度上的差异, 计算了不同质量范围的 AGB 单星的重核素超丰情况.

尽管对流模型取得了较大的成功, 但它仍存在一些缺陷. 例如: ¹³C 燃烧产生的过多能量会改变热脉冲中某个方向的恒星结构, 从而导致中子数密度过高而不适于发生 s-过程核合成.

20 世纪 80 年代, 不仅是 AGB 星核合成理论发展过程中的一个重要时期, 而且是天文观测取得丰硕成果的一个重要阶段. 继 Merrill 之后, 大量天文观测表明, ^{99}Tc 不仅存在于 S 星中, 而且还广泛分布于演化中的 C 星上. 这再次证明了 AGB 星上确实发生了重元素的核合成以及第三次挖掘. 另外, 借助于高分辨率的摄谱仪, 人们获得了一大批 AGB 星的重核素丰度数据. 特别应当指出的是, 大量天文观测结果显示: MS 星和 S 星上有高浓度的 s-核素. 在与 AGB 星有关的双星系统的观测数据中, 人们还发现了 s-核素 Ba 超丰的 Ba 星. 正是在这些天文观测结果的推动下, AGB 星核合成理论的研究在 20 世纪末得到了快速的发展.

4.4 辐射核合成模型

继 Iben 之后, Straniero 等^[29, 30]在 AGB 星的演化和核合成研究方面跨出了重要的一步. 他们指出: ^{13}C 中子源不是在热脉冲的对流状态下, 而是在脉冲间隔的辐射状态下释放中子并合成新核素的. 这避免了 ^{13}C 燃烧释放的能量导致热脉冲方向上的恒星结构的变化. 从这种机制出发, 他们提出了一个新的 AGB 星核合成模型. 在这个模型下, AGB 星的 s-过程核合成可以归结为以下几个阶段: (1) 脉冲熄火之后, 少量质子下落到富氮的中间壳层顶部, 形成一个质子袋; (2) 当氢壳层被重新点燃时, ^{13}C 袋形成; (3) 在热脉冲即将到来前, ^{13}C 袋所在的区域被压缩, 并被加热到 $0.8 \times 10^8 \text{ K} - 0.9 \times 10^8 \text{ K}$, 这时 ^{13}C 通过反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 释放中子, 这些中子被 ^{13}C 袋中的种子核通过 s-过程俘获并形成新的重核素; (4) 在热脉冲的对流状态下, ^{13}C 袋中的物质跟氢燃烧壳层的灰烬 (包含种子核 ^{56}Fe 和 ^{14}N) 以及在以前的热脉冲中生成的物质相混合; (5) 当 ^{22}Ne 释放出少量中子时, 这些混合物质在高 neutron 密度下生成一些不稳定核素; (6) 热脉冲熄火后, 这些物质的一部分 (包含新合成的重核素和 ^{12}C) 被“第三次挖掘”到恒星表面; (7) 上述的热脉冲重复发生, 直至恒星演化为白矮星.

由这个模型出发, 人们很快发现, 质子袋的分布形状决定了 AGB 星重核素的丰度分布, 再次证实了太阳的核素丰度分布是星系演化的平均结果, 所有富 s-过程恒星的重核素丰度都与太阳的相类似. Gallino 等^[31]采用新的 ^{13}C 和 ^{22}Ne 的 α 俘获反应

率数据, 对模型的中子源进行了分析, 发现其中子辐照分布已不再是指数形式, 而是多个单辐照的叠加. 此外, 人们还预言, s-过程弱分量的产生场所可能是大质量星. 而 s-过程强分量将导致恒星上的 Pb 的丰度高出其他所有重核素的丰度, 即预言了 Pb 星的存在.

应当指出, 我国天体物理学家也在 AGB 星核合成理论方面开展了工作. 除了前面已经提到的^[27, 28]外, 张波等^[32, 33]建立了在不同金属丰度下确定不同核合成过程对重元素总丰度相对贡献的计算模型, 首次提出了描述各个核合成过程贡献大小的分量系数概念.

综上所述, AGB 星核合成理论在 50 多年的历史中取得了巨大的成就. 但是, 我们也看到其中还有不少疑难问题有待解决. 例如, ^{13}C 袋的产生机制; Ba 星的重元素丰度分布及轨道数目的确定和模型拟合; 贫金属 AGB 星核素丰度分布的计算公式等. 其中, ^{13}C 袋的产生机制, 无论是对辐射模型还是对流模型, 都是一个关键问题. 质子到底如何混到大气包层底部? 这个问题也是近年来质子动力学激发机制的重要研究课题. 它的最终解决将取决于恰当的 AGB 星输入量. 但在目前的实验和观测条件下, 这显然受到很大限制. 此外, s-过程的强分量和弱分量对 AGB 星的核合成计算也有一定的影响. 但是, 作为弱分量产生场所的大质量 AGB 星的研究仍处于初步的探索阶段, 强分量的研究又与尚未完善的 r-过程理论密切相关.

5 展望

虽然 AGB 星核合成理论存在以上诸多困难, 但是已经取得的一些成果仍然是令人鼓舞的. 例如, 20 世纪 90 年代, Herwig 等^[34, 35]通过对扩散过程进行近似处理得到了一个合理的 ^{13}C 袋的产生机制. 另外, 严格的质子动力学计算也表明了存在产生 ^{13}C 袋的可能性. 本世纪初, 欧洲南部 3.6 m 的天文望远镜观测到了 3 颗 Pb 星^[36]. 这有力地证实了 s-过程强分量理论的预言. 这些理论和实验的成果使我们敢于断言: 在人类跨入新世纪之后, 随着实验和天文观测数据的不断积累, AGB 星核合成理论研究也将迎来更光明的未来.

参 考 文 献:

- [1] Iben I Jr, Renzini A. The Role of Semiconvection in Bringing Carbon to the Surface of Asymptotic Giant Branch Stars of Small Core Mass[J]. *Ap J*, 1982, **259**: 79.
- [2] Shaviv G, Salpeter E E. Convective Overshooting in Stellar Interior Models[J]. *Ap J*, 1973, **184**: 191.
- [3] Sweigart A V, Gross P G. Evolutionary Sequences for Red Giant Stars[J]. *Ap J Suppl*, 1978, **36**: 405.
- [4] Langer N. Non-local Treatment of Convection and Overshooting from Stellar Convective Cores[J]. *Astron Astrophys*, 1986, **164**: 45.
- [5] Renzini A. Some Embarrassments in Current Treatments of Convective Overshooting[J]. *Astron Astrophys*, 1987, **188**: 49.
- [6] Chiosi C, Bertelli G, Bressan A. New Developments in Understanding the HR Diagram[J]. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1992, **30**: 235.
- [7] Reimere D. Circumstellar Envelopes and Mass Loss of Red Giant Stars[C]. In: Baschek B, Kegel W H, Traving G ed. *Problems in Stellar Atmospheres and Envelopes*. Berlin: Springer-Verlag, 1975, 229.
- [8] Iben I Jr, Renzini A. Single Star Evolution I. Massive Stars and Early Evolution of Low and Intermediate Mass Stars[J]. *Phys Rep*, 1984, **105**: 329.
- [9] Lattanzio J C, Boothroyd A I. Nucleosynthesis of Elements in Low to Intermediate Mass Stars through the AGB Phase[C]. In: Bernatowicz T J, Zinner E ed. *Astrophysical Implications of the Laboratory Study of Presolar Materials*. Woodbury, NY: Am Inst Phys, 1997, 85.
- [10] Schwarzschild M, Härm R. Hydrogen Mixing by Helium-shell Flashes[J]. *Ap J*, 1967, **150**: 961.
- [11] Sanders R H. s-process Nucleosynthesis in Thermal Relaxation Cycles[J]. *Ap J*, 1967, **150**: 971.
- [12] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, *et al.* Synthesis of the Elements in Stars[J]. *Rev Mod Phys*, 1957, **29**: 547.
- [13] Merrill P W. Technetium in the Stars[J]. *Science*, 1952, **115**: 484.
- [14] Greenstein J L. Astrophysics[C]. In: Ridenour L N ed. *Modern Physics for the Engineer*. New York: McGraw-Hill, 1954, 235.
- [15] Clayton D D, Fowler W A, Hull T E, *et al.* An Analysis of s-process[J]. *Ann Phys*, 1961, **12**: 331.
- [16] Seeger P A, Fowler W A, Clayton D D. Nucleosynthesis of Heavy Elements by Neutron Capture[J]. *Ap J Suppl*, 1965, **11**: 121.
- [17] Clayton D D. Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis[M]. New York: McGraw-Hill. 1968, 1—612.
- [18] Clayton D D, Ward R A. s-process Studies, Exact evaluation of an exponential distribution of exposures[J]. *Ap J*, 1974, **193**: 397.
- [19] Ulrich R K. The s-process in Stars[C]. In: Schramm D N, Arnett W D ed. *Explosive Nucleosynthesis*. Austin: University of Texas Press. 1973, 139.
- [20] Iben I Jr. Neon-22 as a Neutron Source, Light Elements as Modulators, and s-process Nucleosynthesis in a Thermally Pulsing Star[J]. *Ap J*, 1975, **196**: 549.
- [21] Iben I Jr. Stellar Structure and Evolution with Emphasis on the Evolution of Intermediate Mass Stars[C]. In: Bouvier P, Maeder A ed. *Advanced Stages in Stellar Evolution*. Saunery, Switzerland: Geneva Observatory. 1977, 1.
- [22] Mathews G J, Takahashi K, Ward R A. Stellar Technetium and Niobium Abundances as a Measure of the Lifetime of AGB Stars in the Third Dredge-up Phase[J]. *Ap J*, 1986, **302**: 410.
- [23] Ward R A. Branching in the s-process: the effects of an intermittent neutron flux and long-lived isomeric states[D]. Ph D T, Houston: Department of Space Physics and Astronomy, Rice University, 1976.
- [24] Boothroyd A I, Sackmann I J. The Production of Low-mass Stars. IV. Carbon Stars[J]. *Ap J*, 1988, **328**: 632.
- [25] Iben I Jr. Carbon Star Formation and Neutron-rich Isotope Formation in Low-mass Asymptotic Giant Branch Stars[J]. *Ap J*, 1983, **275**: 65.
- [26] Beer H. An Analytical Formulation of the Double-pulse s-process Model[J]. *Ap J*, 1991, **379**: 409.
- [27] 王新舫, 张波, 彭秋和. 低质量 AGB 星重元素的核合成[J]. *天文学报*, 1996, **37**: 243.
- [28] 刘永新, 张波, 彭秋和. 小质量 AGB 星热脉冲阶段氟的核合成[J]. *天体物理学报*, 1996, **16**: 57.
- [29] Straniero O, Chieffi A, Limongi M, *et al.* Evolution and Nucleosynthesis in Low-mass Asymptotic Giant Branch Stars I. Formation of Population I Carbon Stars[J]. *Ap J*, 1997, **478**: 332.
- [30] Straniero O, Gallino R, Busso M, *et al.* Radiative C-13 Burning in Asymptotic Giant Branch Stars and s-process[J]. *Ap J*, 1995, **440**: 85.
- [31] Gallino R, Arlandini C, Busso M, *et al.* Evolution and Nucleosynthesis in Low-mass Asymptotic Giant Branch Stars II. Neutron Capture and the s-process[J]. *Ap J*, 1998, **497**: 388.
- [32] Zhang Bo, Li Ji, Zhang Caixia, *et al.* A Model for Calculating the Abundance of Neutron-capture Element in Metal-poor Stars[J]. *Ap J*, 1999, **513**: 910.

- [33] Li Ji, Zhang Bo, Wei Guoqiang, *et al.* Abundance of Elements in Metal-poor Star HD 126238[J]. *Chin Phys Lett*, 1999, **16**(8), 619.
- [34] Herwig F, Blöcker T, Schönberner D, *et al.* On the Validity of the Core-mass Luminosity Relation for TP-AGB Stars with Efficient Dredge-up[J]. *Astron Astrophys*, 1998, **340**, 43.
- [35] Herwig F, Schönberner D, El Eid M. Stellar Evolution of Low and Intermediate-mass Stars IV. Hydrodynamically-based Overshoot and Nucleosynthesis in AGB Stars[J]. *Astron Astrophys*, 1997, **324**, 81.
- [36] Van Eck S, Goriely S, Jorissen A, *et al.* Discovery of Three Lead Stars[J]. *Nature*, 2001, **412**, 793.

Nucleosynthesis of Elements in Evolution Processes of Asymptotic Giant Branch Stars*

ZHANG Miao-jing^{1,3,4}, ZHANG Bo^{1,2,3}, LI Guang-lie^{1,3}

(1 *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

2 *Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China;*

3 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

4 *Department of Physics and Electron Science, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)*

Abstract: The development of nucleosynthesis theory in Asymptotic Giant Branch (AGB) stars is reviewed. Particularly, the slow neutron capture processes (s-processes) and the evolution of AGB stars are briefly described.

Key words: asymptotic giant branch star; stellar evolution; slow neutron capture process

* **Foundation item :** Major State Basic Development Program (G20000774); Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJCX2-N11); National Natural Science Foundation of China (19835010, 19673002, 10175074)